

**Марценюк О. С., д. т. н.**

*Національний університет харчових технологій*

**Пастушенко І. М.**

*Український науково-дослідний інститут цукрової промисловості*

### **ОЦІНКА ШВИДКОСТІ РУХУ ПОВЕРХНІ КАВІТАЦІЙНИХ БУЛЬБАШОК ПРИ ПАРОКОНДЕНСАЦІЙНІЙ КАВІТАЦІЇ**

Проаналізовано вплив різниць тисків, концентрацій і температур на інтенсивність руху поверхні кавітаційних бульбашок.

**Ключові слова:** кавітаційна бульбашка, парогазова суміш, колапс, швидкість деформації.

**Марценюк А.С., Пастушенко И.Н.**

### **ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ ПАРОКОНДЕНСАЦИОННОЙ КАВИТАЦИИ**

Проанализировано влияние разностей давлений, концентраций и температур на интенсивность движения поверхности кавитационных пузырьков.

**Ключевые слова:** кавитационный пузырек, парогазовая смесь, коллапс, скорость деформации.

**Martsenyuk A, Pastushenko I.**

### **THE ESTIMATION OF MOTION SPEED OF CAVITATING BUBBLES' SURFACE AT VAPOR-CONDENSATION CAVITATION**

The influence of differential pressures, concentrations and temperatures on intensity of the motion of cavitating bubbles' surface is analysed.

**Key words:** cavitating bubble, vapor-gas mixture, collapse, speed of deformation.

Ефективність дії кавітаційних пристроїв, які все ширше використовуються у харчових виробництвах, залежить передусім від швидкості руху поверхні (сплескування) заповнених парогазовою сумішшю

кавітаційних бульбашок (КБ) за умови досить рівномірного їх розподілу в робочому середовищі.

Розширення і стиснення КБ відбувається внаслідок сумісної дії трьох рушійних сил між парогазовою фазою всередині бульбашок і оточуючою їх рідкою фазою: різниці тисків, різниці концентрацій і різниці температур. Проаналізуємо вклад цих чинників в інтенсивність зміни розмірів КБ, вважаючи в першому наближенні, що швидкість розширення і стиснення бульбашок однакова і менша від швидкості зростання та падіння тиску в кавітаційному пристрої.

*Вплив різниці тисків* має визначальну роль в розширенні і стисненні КБ при різних змінах тиску в рідинах з невеликим вмістом газу в межах температур досить нижчих від точки кипіння, тобто за відсутності впливу міжфазних переходів. Мікроскопічні зародки бульбашок, потрапляючи в зону розрідження, швидко розширюються в результаті різниці тисків

$$\Delta P = P_{\text{бульб.}} - P_{\text{зовн.}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{бульб.}}$  – тиск парогазової суміші всередині бульбашок;  $P_{\text{зовн.}}$  – сумарний тиск зовні бульбашок, що складається з тиску поверхневого натягу і тиску в рідині. Швидкість розширення (звуження) бульбашок у цьому випадку визначається імпульсом, який отримують навколишні шари рідини під дією різниці тисків, за приблизним рівнянням

$$v_{\text{др}} \approx \sqrt{\Delta P / \rho_p}, \quad (2)$$

де  $\rho_p$  – густина рідини. У реальних умовах при  $\Delta P = 10^5$  Па,  $\rho_p = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> отримаємо  $v_{\text{др}} = 10$  м/с, тобто бульбашка дуже швидко розширюється.

*Дифузійне розширення бульбашок* може мати значний ефект в рідинах з високим газовмістом. Під час розширення бульбашок концентрація газу в них зменшується і газ дифундує з рідини в бульбашку. Швидкість дифузійного розширення бульбашки можна оцінити за рівнянням

$$v_{\text{диф.}} = (c_g / \rho_g) \cdot \sqrt{D/\tau}, \quad (3)$$

де  $c_2$  – масова концентрація розчиненого газу;  $\rho_2$  – густина газу в бульбашці;  $D$  – коефіцієнт дифузії газу в рідині;  $\tau$  – тривалість.

Якщо тривалість дифузійного звуження КБ прийняти рівною тривалості їх перебування в зоні каверни довжиною 1 м, що переміщується зі швидкістю 10 м/с, отримуємо  $\tau = 10^{-1}$  с. За такої тривалості бульбашки повітря з параметрами  $c_2 = 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 10^0$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\tau = 10^{-1}$  с будуть розширюватись зі швидкістю  $v_{\text{диф.}} \approx (10^{-4}/10^0) \cdot \sqrt{10^{-9}/10^{-1}} \approx 10^{-8}$  м/с нехтовно малою порівняно зі швидкістю гідродинамічного процесу.

*Швидкість термічної деформації* КБ можна оцінити порівнянням порядку величин коефіцієнта дифузії газів у рідинах  $D \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с і коефіцієнта теплопровідності води

$$a = \lambda / (c \cdot \rho) \approx 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (4)$$

звідки випливає, що швидкість чисто термічного процесу приблизно на 5 порядків перевищує швидкість дифузійного.

В дійсності швидкість колапсу парових бульбашок під час пароконденсаційної кавітації, створюваної вдуванням через сопло водяної пари в турбулізований потік недогрітої рідини, зростає ще на кілька порядків і може перевищувати швидкість сплескування КБ, утворених при гідродинамічній кавітації, за рахунок взаємного підсилення гідродинамічних і теплових ефектів.

Особливістю пароконденсаційної кавітації є пульсаційний характер процесу сплескування КБ. У початковий момент вдування пари бульбашка росте не лише під дією тисків, а й внаслідок виділення теплоти конденсації на міжфазній поверхні – теплота не встигає відводитись в глибші шари, поверхневий шар рідини перегрівається і генерує додатковий потік пари в бульбашку. Випаровування води і розширення КБ приводить до охолодження міжфазної поверхні і конденсації пари, внаслідок чого в наступний момент бульбашка швидко стискується. Стиснення об'єму пари і її конденсація приводять до повторного циклу розширення КБ. До повної конденсації пари

може відбуватись кілька циклів коливань. Кількість пари, що випаровується і конденсується під час циклів, не однакова.

Міжнародна науково-практична конференція «Удосконалення процесів і обладнання — запорука інноваційного розвитку харчової промисловості», 10-11 квітня 2012 р., Київ, НУХТ, 2012.